干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.01.10

克鲁伦河流域下游水体氢氧同位素与水化学特征①

韩知明， 贾克力， 史小红， 孙 标， 杨 芳， 吴其慧
（内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘 要： 通过对克鲁伦河流域下游河水与地下水的主要离子水化学与氢氧同位素进行分析，结合区域水文地质资料，利用 Durov 图、空间插值、统计分析等方法分析了河水与地下水水化学与氢氧同位素特征。结果表明，河水的水化学类型主要为 Na-Ca-HCO_3 型，地下水水化学类型为 Na-Cl 和 Ca-Na-HCO_3 型。克鲁伦河水主要离子浓度与氢氧同位素空间分布特征显著较地下水稳定、空间差异小。流域内地下水与地表水主要来自降水补给，地下水也是克鲁伦河的主要补给源。氘盈余变化揭示出克鲁伦河水的蒸发分馏程度强于地下水，除流域内水体蒸发主要受地质地貌影响外，人类活动对河水的影响显著于周边地下水。G3 点所在的西庙为一个完整独立的水文地质单元，其表现出的水化学与氢氧同位素特征均异于其他地下水。流域内部分地下水 F^- 含量超标，虽然一定程度是受人类活动影响，但更多的是基于综合水文地质条件基础上的自然现象，已严重威胁人类生存，应引起当地有关部门的高度重视，避免氟中毒事件重现。

关 键 词： 克鲁伦河水；地下水；水化学；氢氧同位素；氘盈余
文章编号： 1000-6060(2019)01-0085-09(0085~0093)

河流是地球水圈中最活跃的部分，河流水体的化学元素组成在很大程度上表征着水体环境质量状况、区域环境化学特征、水体元素分布及迁移转化的规律[1]。氢氧稳定同位素是水体中的一种天然示踪剂，已广泛应用于水文地质学、气候学、生态地质学等领域。不同来源的水具有不同的同位素组成特征，而水在循环过程中的蒸发和扩散等作用会引起同位素分馏现象，因此可以通过水体的氢氧同位素组成变化来示踪水循环、判别其来源[2-5]。同时，水体离子组成是水化学性质的重要方面，研究河流水体化学离子特征对于正确理解河流流域内地表水于地下水的补给关系、离子组成和来源具有重要意义[6]。

克鲁伦河是我国北方第一大湖呼伦湖的主要入湖河流，地处呼伦贝尔草原，是典型的草原型河流。克鲁伦河发源于蒙古国肯特山南麓，自西向东流，经由中央省、肯特省东方，贯穿蒙古国东部，在新巴尔虎右旗克尔伦苏木西北乌兰恩格尔进入我国，又东流至东庙东南注入呼伦湖。近些年来对于克鲁伦河流域的研究主要集中在植被[7]、重金属[8]等方面，而对流域内地下水方面研究较少。此外，笔者在新巴尔虎右旗境内多年的实地考察中发现，当地畜牧业发达，从村落至旗县，常年以放牧为主的牧民中，年龄稍大后均出现不同程度的肘、膝、髋等大关节屈曲僵直，脊柱侧弯驼背畸形的现象，且以女性占多数。而此现象均是地方性氟中毒，氟骨症[9]的表现。在参考地方志与文献资料中了解到，克鲁伦河下游两岸部分地区地方性氟中毒事件频发。2000—2009 年阿敦楚鲁苏木和克尔伦苏木地下水氟均值分别在 1.79~4.35 mg·L^{-1} 和 1.38~3.18 mg·L^{-1}[10]，即便经过多年的改水措施，儿童氟斑牙检出率居高不下，地方性氟中毒病情仍然比较严重[11]。为保障当地居民饮水健康、流域内经济持续发展和生态环境的良性循环，迫切需要对克鲁伦河流域地表水与地下水的水化学组成、分布特征及来源问题进行深入研究。因此，本文通过对克鲁伦河下游流域河水与地下水氢氧同位素与水化学分析，初步探讨了不同水体水化学和氢氧同位素的差异与环境意

① **收稿日期：** 2018-02-02； **修订日期：** 2018-05-07
基金项目： 国家自然科学基金项目(51339002,51509133,51569019,51669022)；内蒙古农业大学优秀青年科学基金(2014XYQ-10)
作者简介： 韩知明(1992-)，男，硕士研究生. E-mail：m15029258074@163.com
通讯作者： 贾克力(1958-)，男，教授. E-mail：kelijia58@126.com

义，并对流域内河水与地下水补排关系做进一步分析，为研究该流域人口饮水安全、水资源合理开发利用和水资源保护措施的制定等提供科学指导和依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

克鲁伦河全长 1 264 km，在我国境内长 206.44 km，总流域面积 7 153 km^2。克鲁伦河两岸被半荒漠的小山和丘陵围绕，河谷宽约 3 000～5 000 m，河面一般宽 40～90 m，河道比较弯曲，河滩、湿地和沼泽较多，因其流域内多为半荒漠地形，地表径流不发育，故支流较少。沿岸牧草发达，是重要的农牧业地带。克鲁伦河流域处于欧亚大陆中高纬地区，气候类型属于典型的中温带大陆季风气候，四季分明，全年盛行西北风。年平均日照为 3 100 h，多年平均气温 0.5 ℃，区域内有季节性冻土，多年平均降水量为 245 mm。克鲁伦河不仅是额尔古纳—黑龙江水系最西的源头之一，也对区域经济发展、气候环境调节和人畜生活环境保障起到了重要作用。

1.2 采样与分析

2017 年 7 月，在参考区域水文地质资料与克鲁伦河周边人口生产生活特征的基础上，研究小组沿着克鲁伦河两岸进行平行采样，从阿敦楚鲁起至克鲁伦河入湖口，共收集水样 26 个，其中河水水样 8 个，井水水样 18 个，采样点位置见图 1。现场采用 TDS 测试笔(EUTECH，TDS Testrl0 low +)测量水样中总溶解性固体(TDS)；河水采集在水面以下0.5 m 处；井水由当地牧民水泵抽水稳定后接取。氢氧同位素分析的样品用100 mL 聚乙烯瓶作为采样瓶，使用前用原水润洗 3 次，水样通过 0.45 μm 的滤膜过滤后进用 PARAFILM 密封，防止蒸发分馏。氢氧同位素分析采用美国 LGR DT 100 液体同位素分析仪测定，每个样品重复测量 6 次，取平均值，测试精度为 ±0.2‰。用于离子测定的水样装入 100 mL 聚乙烯瓶后，及时运回实验室，用循环水多用真空泵和孔径0.45 μm、直径50 mm 的微孔滤膜过滤水样，过滤后滤液用于阴、阳离子的测定。Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-、F^-、NO_3^- 用美国戴安(DIONEX)公司生产的 ICS-90 离子色谱仪检测，精度为 ±5%。水中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 间平衡关系可知，当 pH 介于 6～10时 HCO^{-3} 占据绝对优势，CO_3^{2-} 可忽略不

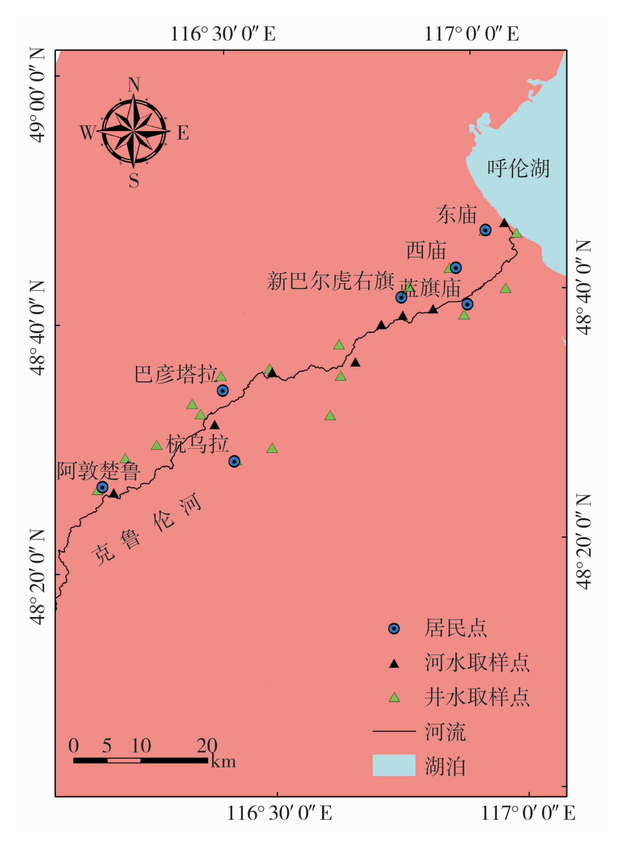


图 1 采样点位置

Fab. 1 Map of sampling sites

计[12]，根据溶液中电荷守恒原理及公式(1)、(2)计算得到 HCO_3^- 含量[13]。

$$pH = lg\left[H^+\right] \quad (1)$$

$$\frac{\left[H^+\right]\left[CO_3^{2+}\right]}{\left[HCO_3^-\right]} = 10^{-10.33} \quad (2)$$

式中：$\left[pH\right]$ 为实测值；$\left[H^+\right]$ 为氢离子浓度；$\left[CO_3^{2-}\right]$ 为碳酸根离子浓度；$\left[HCO_3^-\right]$ 为碳酸氢根离子浓度。

2 结果分析

2.1 主要离子浓度

克鲁伦河流域下游河水与周边井水的阴阳离子浓度统计分析结果见表 1。河水阳离子浓度平均值的高低顺序为 $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$，井水阳离子浓度平均值的高低顺序为 $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$。河水和井水阴离子浓度高低顺序都为 $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > F^-$，说明地下水与河水之间存在一

表 1　克鲁伦河流域下游不同水体水化学分析结果

Tab.1　Analysis results of different water chemistry of downstream Kherlen River

水体类型	特征值	pH	TDS mg·L⁻¹	K^+ mg·L⁻¹	Na^+ mg·L⁻¹	Mg^{2+} mg·L⁻¹	Ca^{2+} mg·L⁻¹	F^- mg·L⁻¹	Cl^- mg·L⁻¹	HCO_3^- mg·L⁻¹	SO_4^{2-} mg·L⁻¹	δD ‰	$\delta^{18}O$ ‰	*d* ‰
河水	最小值	8.32	237	4.84	48	18	56	1.22	19	215	1.10	-66.64	-5.75	-25.41
(8 个)	平均值	8.53	245	5.26	54	19	58	1.33	24	228	2.35	-65.03	-5.26	-22.99
	最大值	8.66	270	5.51	66	20	61	1.46	36	252	3.26	-62.94	-4.90	-20.56
	标准差	0.13	10	0.21	5	1	2	0.07	5	12	0.65	1.12	0.31	1.88
井水	最小值	7.09	316	0.47	130	2	5	0.09	52	122	1.46	-102.85	-14.06	-14.30
(18 个)	平均值	7.67	771	4.86	250	41	45	2.12	191	440	29.12	-90.79	-11.80	3.63
	最大值	8.61	1 246	10.28	497	93	85	6.72	457	789	121.69	-78.97	-8.55	11.61
	标准差	0.37	265	2.51	116	25	24	1.77	97	212	39.53	7.39	1.50	6.95

定的水力联系。河水 TDS 含量变化浮动小,平均值为 245 mg·L⁻¹,高于世界河流平均值(115 mg·L⁻¹)[14],由于河流搬运距离和流经时间较长,且处于下游段,所以 TDS 含量相对较高。而克鲁伦河两岸井水中 TDS 含量变化范围为 316 ~ 1 246 mg·L⁻¹,井水的各离子浓度变化范围与标准差均大,表明地下水水化学组成有所差异。其中克鲁伦河沿岸井水 F^- 浓度变化范围为 0.09 ~ 6.72 mg·L⁻¹,平均值为 2.12 mg·L⁻¹,已超出《生活饮用水卫生标准》(GB/T14848—2017)中饮用水的氟化物限值 1.0 mg·L⁻¹,所以克鲁伦河沿岸周边地下水水质面临严峻问题。

2.2　水化学类型

Durov 图在水化学类型分析过程中,能较好地显示不同离子的相对质量浓度,并可进行水化学分类和水文地球化学规律分析。如图 2 所示,克鲁伦河水化学类型为 Na - Ca - HCO_3,HCO_3^- 是河水最主要的阴离子组成,占阴离子总摩尔数的70% 以上,其变化范围为 215 ~252 mg·L⁻¹,平均值为 228 mg·L⁻¹,与我国窟野河的水化学类型相似[15]。地下水水化学类型为 Na - Cl、Ca - Na - HCO_3,HCO_3^- 是地下水最主要的阴离子组成,占阴离子总摩尔数的 46 %,其变化范围为 122 ~789 mg·L⁻¹,平均值为 440 mg·L⁻¹,其次是 Cl^-,变化范围为 52 ~457 mg·L⁻¹,平均值为 191 mg·L⁻¹。相对于地下水而言,河水 pH 变化范围为 8.32 ~8.66;河水 TDS 变化范围为 237 ~270 mg·L⁻¹,河水 pH 与 TDS 指标均比地下水稳定。同时 Durov 图中克鲁伦河周边地下水分布散乱、差异显著,指示地下水可能受不同水化学机制作用。

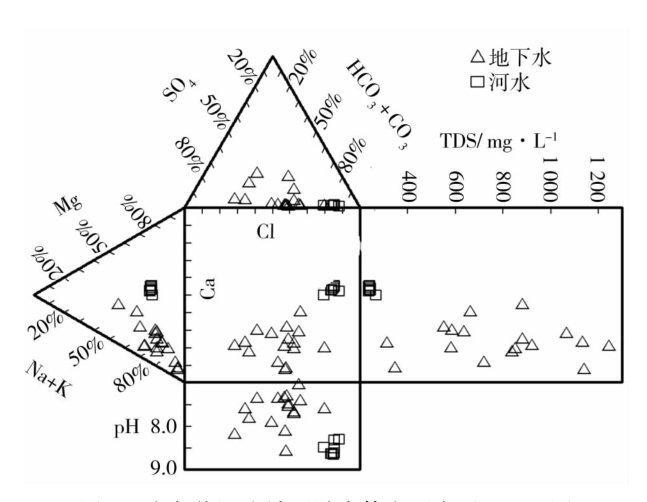


图 2　克鲁伦河流域下游水体主要离子 Durov 图

Fig.2　Durov main ion water downstream Kherlen Basin plan

2.3　水体氟离子分布特征及来源

化学元素进入地下水系统并在其中运移是由特定的水文地球化学环境决定的,因此水化学特征制约着氟的迁移和富集,水化学成分不同,氟含量亦不同。研究区中 HCO_3^- 作为地下水中的主要阴离子,对水化学环境有着重要的影响,一般情况下,氟在碱性环境中以氟离子形式存在;在酸性环境中则以络合物酸根的形式存在[16]。由图 3 可知,HCO_3^- 含量与 F^- 含量呈正相关关系,随着 HCO_3^- 含量的升高,F^- 的含量也随之增大。随着水中 HCO_3^- 增多,碱性增强,Ca^{2+}、Mg^{2+} 等离子与 OH^- 形成沉淀,进而使水中的氟离子含量升高。此外,Na^+/Ca^{2+} 比值的增大,F^- 含量呈升高的趋势,说明地下水中的 Na^+ 含量增多,Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量减少,水中可与 F^- 生成沉淀减少,所以导致水中氟离子含量升高,反之亦然。

通过对克鲁伦河流域下游水体中的氟离子 Kriging 插值,得到图 4。可以看出区内大多数地方 F^- 浓度较高且超出国家饮用水标准,总体上研究区

图 3　氟离子与 HCO_3^-、Na^+/Ca^{2+} 含量关系图

Fig. 3　Relation diagram of fluorine ions with HCO_3^- and Na^+/Ca^{2+} content

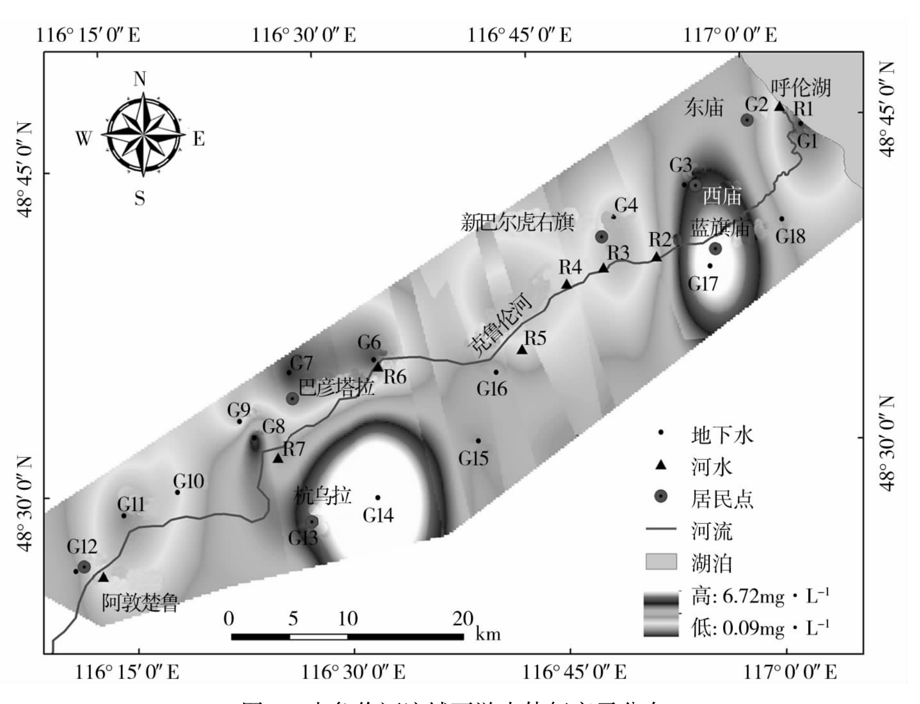


图 4　克鲁伦河流域下游水体氟离子分布

Fig. 4　Distribution of fluorine ion water of downstream Kherlen Basin

水体 F^- 从阿敦楚鲁至入湖口处经历了浓度增大、减小再增大的过程，在杭乌拉附近的 G14、蓝旗庙 G17 和西庙 G3 处，F^- 浓度达到极大值，浓度分别为：6.72 mg · L^{-1}、4.97 mg · L^{-1}、2.76 mg · L^{-1}。纵观低氟区，地貌类型多为低山，地层岩性为含氟量较低的呼查山组与大磨拐河组砂岩，地势陡峭，使得地下水径流相对较快，水—岩之间的相互作用不充分，因此形成低氟区；而高氟区多处在河谷阶地和平原区，地势平坦，地下水流动相对缓慢，水—岩之间的相互作用较充分。同时，在表 1 中发现，克鲁伦河水样中的 F^- 浓度变化为 1.22～1.46 mg · L^{-1}，平均值为 1.33 mg · L^{-1}，含量显著较高，说明 F^- 富集范围较广并非简单的局部污染，可能与沿岸熟皮厂和硝矿主要排放的污染物是氨氮、农药、毒物污染以氟化物、砷、汞、酚[17]有关。加之区内燕山早期细粒斑状花岗岩中，挥发分矿物—萤石（CaF_2）含量较高对成矿元素的运移富集是有利条件，而在阿敦楚鲁西部与杭乌拉东部均有大规模的采矿区。此外，流域内火山口遗迹较多，而世界火山分布与地方性氟中毒病区形影相随[9]。克鲁伦河下游跨界含水层地下水沿着东西方向随着经度升高水质逐渐变差，其中在含水层东北部地区出现大面积影响生命异常的氟化物[18]。因此研究区内水体 F^- 含量的超标所导致的地方性氟中毒事件，原因是多方面的，虽然 F^- 污染更多的是基于综合的水文地质条件基础上的自然现象，但人类在生产生活中未经处理的或者处理不好的废水排放到环境中则是一种基本污染类型，它恶化了水质。加之矿产资源丰富，人类在开采矿产

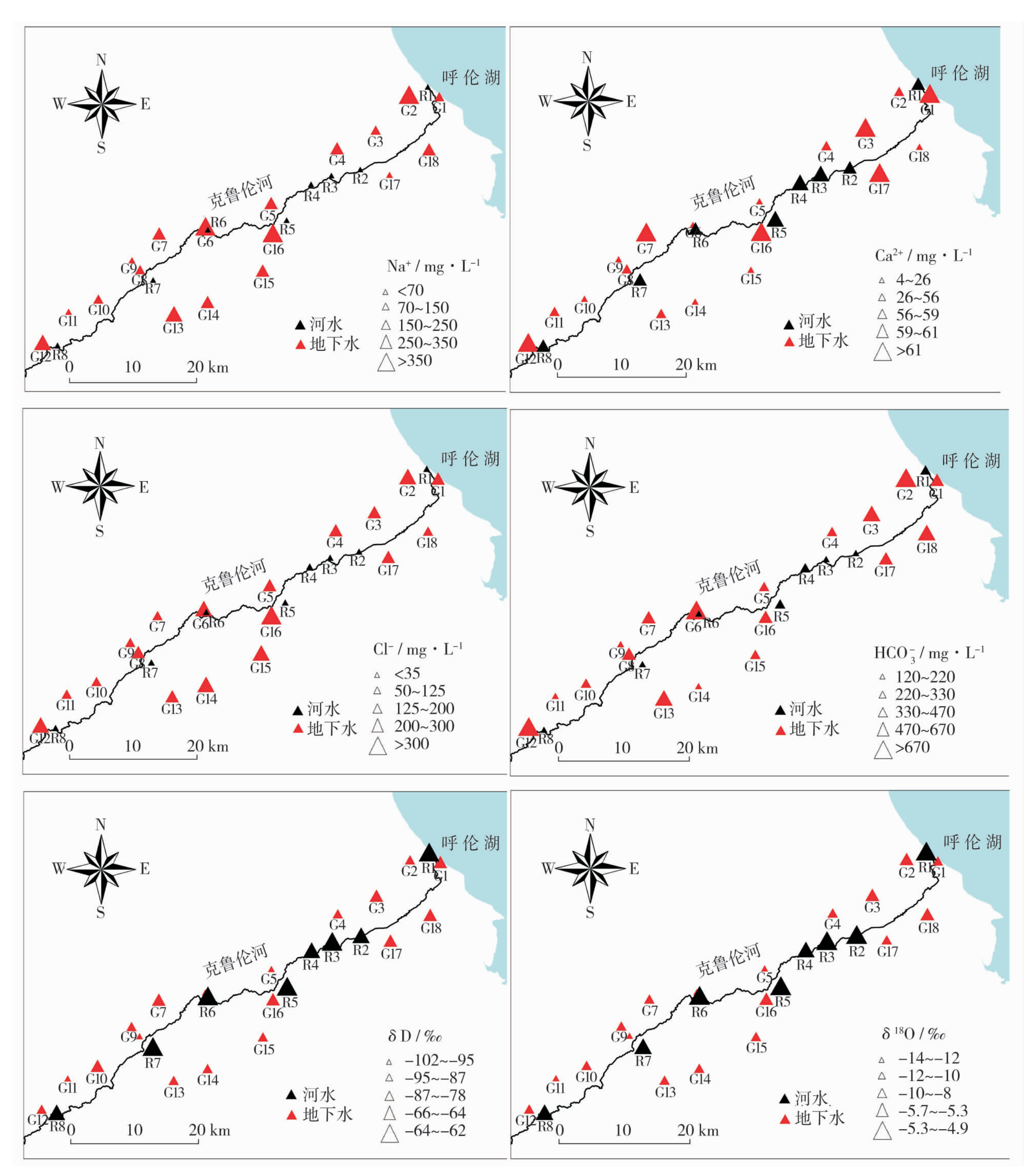


图 5　克鲁伦河下游河水与地下水主要离子和氢氧同位素空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of major ions and oxygen isotopes of downstream Kherlen River and groundwater

的同时也造成地下水水质负面的影响。

2.4　主要离子和氢氧同位素空间分布特征

克鲁伦河下游河水、地下水主要阳离子 Na^{+}、Ca^{2+}、阴离子 Cl^{-}、HCO_3^{-} 和氢氧同位素空间分布见图 5,河水阴阳离子浓度随沿程变化微弱不显著,其中主要阴离子 HCO_3^{-} 在 R4、R5 处有较明显的升高,其原因主要与区内所分布的花岗岩、变质岩和碳酸盐岩有关,花岗岩质地坚硬,较难被风化作用侵蚀,而碳酸盐岩石在常年径流冲刷作用下较易释放出 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^{-} 等离子[19],此外,参考地质资料发现碳酸盐可溶岩的出露主要集中在该段,所以导致克鲁伦河下游主要离子含量有所不同。克鲁伦河下游河水氢氧同位素空间分布特征基本一致,河水氢氧同位素变化范围分别为 -66.64‰ ~ -62.94‰

和 -5.75‰ ~ -4.90‰。河水氢氧同位素从阿敦楚鲁至入湖口处有明显的富集,但总体变化幅度较小,说明克鲁伦河在该段处有较稳定的补给源。

相较于河水而言,克鲁伦河两岸周边地下水水化学特征在组成类型和空间分布上都较河水复杂。地下水中的 HCO_3^-、Cl^- 空间分布与 Na^+ 基本相似,均经历了一个浓度由高至低再升高的过程,且涨幅处位于碳酸盐可溶岩的出露段。沿克鲁伦河方向,虽然克鲁伦河南北两岸地下水取样点分布不均,但从地下水主要离子浓度分布上可以看出,南岸地下水离子含量总体上高于北岸,同时,在现场所测得TDS、pH、盐度等水体常规指标发现,北岸地下水水质显著优于南岸,这也是区内沿克鲁伦河流域,北岸人口与居民点多于南岸的原因。克鲁伦河下游地下水氢氧同位素空间分布特征基本一致,地下水氢氧同位素变化范围分别为 -102.85‰ ~ -78.97‰和 -14.06‰ ~ -8.55‰。研究区内地下水氢氧同位素显著贫于河水,指示地下水可能是克鲁伦河的主要补给来源,且沿河水流向方向,地下水氢氧同位素有富集的趋势,在入湖口处附近,同位素富集作用最为显著。

2.5 水体氢氧同位素关系

根据克鲁伦河下游地下水与河水氢氧同位素关系(图6)看出,地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 大多落在克鲁伦河降水线[20]上,说明各水体的主要水源来自于大气降水,且没有发生蒸发分馏。克鲁伦河下游含水层主要发育有孔隙水与裂隙水,孔隙水主要分布在山间谷地、河谷洼地等第四系松散沉积物含水层中;基岩裂隙水赋存于不同时期侵入岩、火成岩及变质岩的裂隙中,在山地丘陵区,裂隙比较发育、岩石破碎、易接受大气降水补给、入渗条件好[18]。河水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 处于克鲁伦河降水线下方,同时河水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值相比地下水而言更加稳定与富集,说明河床宽阔、流速缓慢的克鲁伦河下游段易使河水受到强烈蒸发作用的影响,导致同位素过度分馏,与克鲁伦河地处半干旱地区的事实相符。

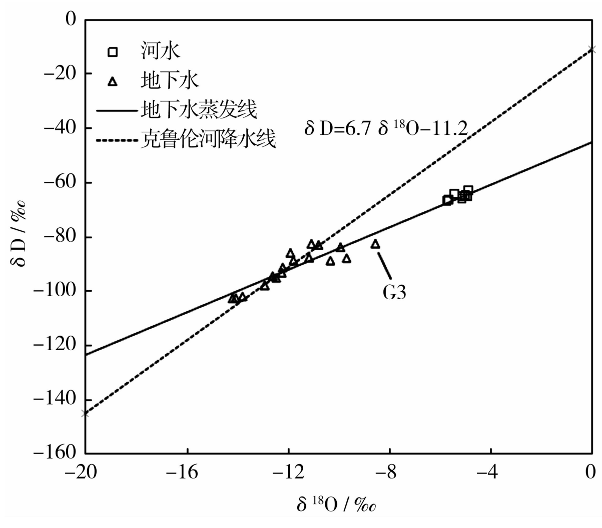


图6 克鲁伦河下游地下水与河水氢氧同位素关系

Fig.6 Kherlen downstream groundwater and river water isotopic relations

比较研究区内的地下水数据,对氢氧同位素回归拟合,得出相应的地下水蒸发线(图6),可以看出河水样与地下水样显著区分为两组,并均匀的分布在地下水蒸发线上,表明河水与地下水具有相同水源的特征,而落在该蒸发线不同部位的水样则反映了它们遭受不平衡蒸发程度的差异。同时,也进一步的指示出除了大气降水是该研究区水体的主要补给外,地下水也是克鲁伦河的主要补给源,与上述地下水、河水的氢氧同位素空间分布所指示的信息一致。编号为G3的地下水水样明显的较其他井水水样富集同位素,且显著偏离地下水蒸发线。参考区域水文地质资料发现,克鲁伦河谷底地带主要分布第四系松散沉积物,成为区内地下水的排泄区,克鲁伦河则是盆地地下水排泄的重要通道。而G3所在的西庙附近为一个完整独立的水文地质单元。地下水在接受大气降水补给的同时,从低山丘陵区流经山前倾斜平原直至平原区向湖泊或沼泽湿地排泄。地下水运动过程中,强烈的蒸发作用亦是地下水的主要排泄方式之一,因此G3附近的同位素大小为区内地下水氢氧同位素极大值。

2.6 氘盈余的分布及其环境意义

氘盈余“*d*”作为研究地下水补给来源的一个重要指标,能有效指示地下水环境特征[21]。当水体受到强烈蒸发时,发生动力同位素分馏效应,导致氘盈余值下降[22],当水体渗入地下后,其不同氢氧同位素组成,通过混合、交换,将趋于一个平均同位素组成。如果地下水在缓慢径流过程中,受动力学影响的蒸发作用再次活跃起来,“*d*”值将变得更低,甚至为负,而水中的盐分将变得更高,两者成负相关,这对再度蒸发的地下水尤为典型[23]。克鲁伦河下游河水氘盈余值为 -25.41‰ ~ -20.56‰,平均值为 -22.99‰;地下水为 -14.31‰ ~ 11.61‰,平均值为3.63‰。河水中的氘盈余偏负程度最大,而全球降水中过量氘值为10‰,进一步说明河水的蒸发最

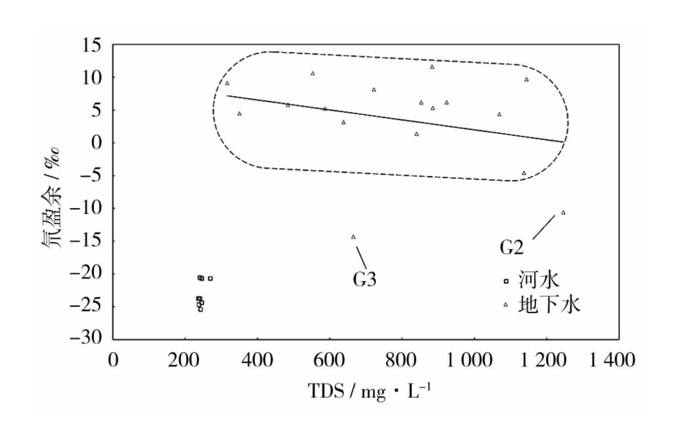


图 7　克鲁伦河下游地下水、河水氘盈余与 TDS 关系

Fig. 7　Correlation of deuterium excess and TDS in groundwater and river water of downstream Kherlen River

为强烈。观察图 7 发现,河水样 TDS 变化较稳定,而河水氘盈余在 R4 点接近新巴尔虎右旗附近时被显著区分为两组,一组呈纵向分布,另一组呈横向分布。说明沿河水流动方向直至入湖过程中,河水的蒸发强度逐渐变强,在进入新巴尔虎右旗附近后使得同位素分馏作用加剧。区内海拔变化 500 ~ 800 m,山脉走向大致呈北东—西南向,地貌形态包括高原、丘陵、沙丘、低地。同时,河水氘盈余在 R4 处开始进入密集的人类生活区,前后河水样的氘盈余未出现明显的衔接平缓的变化趋势,而被显著区分。说明克鲁伦河水蒸发作用除受地形地貌等自然因素控制外,人类活动因素也是重要影响之一。

图 7 中克鲁伦河周边地下水的 TDS 基本随氘盈余的减小而增大,两者呈负相关,且 TDS 空间差异明显、变化范围显著,推测强烈的蒸发作用是导致地下水盐化的重要机制。实地取样中发现区内除有大河克鲁伦河外,地表径流不发达,支流甚少。在面积广阔、连绵起伏的丘陵区内,散布有规模不同、形状不一的封闭洼地,当地俗称泡子。在一些规模较大的封闭洼地中,有的被张性断层含水带所连接和沟通,其潜水径流畅通,多形成低矿化度淡水,此类洼地以克鲁伦河北部丘陵区最多;而在没有地下水排泄通道的大型封闭洼地,底部常有数量不大的风化裂隙水,其排泄途径只能依靠蒸发,盐分逐年积累形成盐水盆地。此外,散布区内有不少椭圆形的洼地,旱季时干枯无水,雨季时则成为季节性的湿地,有利于渗入补给地下水。从图 7 发现,G2、G3 点处地下水的氘盈余明显偏负,分别为 −10.58‰、−14.31‰,接近巴丹吉林沙漠地下水的平均氘盈余值 −15.707‰[24],较负的氘盈余则揭示其可能存在二次蒸发。由于 G2、G3 主要分布在阿尔山牧场一带,其地形为克鲁伦河谷平原区。地势平坦,地下水径流缓慢,并接受强烈的蒸发,循环作用不显著,使其同位素强烈富集,加之地下水易于聚集,从而使地下水中化学成份发生变化,盐分增高。G3 附近的完整独立水文地质单元广泛分布有中生界火山岩及华力西期花岗岩、中生界碎屑岩,由于受地质构造的影响,断裂相当发育,同时次生裂隙也十分发育,为基岩裂隙水的赋存和运动提供了有利条件。根据钻孔资料,岩石风化带深度可达 40 ~ 60 m,是地下水赋存的良好空间。

3　结 论

(1) 通过对克鲁伦河流域下游河水与地下水的主要离子组成和氢氧同位素的系统研究,表明该区域河水的水化学类型主要为 Na − Ca − HCO_3 型,HCO_3^- 占阴离子总摩尔数的 70% 以上;地下水水化学类型为 Na − Cl、Ca − Na − HCO_3,HCO_3^- 亦是地下水最主要的阴离子组成。沿河水流向方向,地下水氢氧同位素有明显富集趋势,其主要阴阳离子均经历了一个浓度由高至低再升高的过程,且涨幅处位于碳酸盐可溶岩的出露段。

(2) 研究区内河水主要离子浓度与氢氧同位素空间分布特征显著较地下水稳定、空间差异小。克鲁伦河下游南岸地下水离子含量总体高于北岸,各指标显示南岸水质较差于北岸,北岸更适合人类生产生活。受自然因素与人类活动影响,流域内部分地下水 F^- 含量严重超标,井水 F^- 浓度变化范围为 0.09 ~ 6.72 mg · L^{-1},平均值达 2.12 mg · L^{-1}。

(3) 克鲁伦河下游河水与地下水的氢氧同位素关系指示大气降水是该流域的补给源外,地下水也是克鲁伦河的主要补给源。氘盈余变化指示河水的蒸发分馏程度显著强于地下水,除流域内水体蒸发强度主要受地质地貌影响外,人类活动对河水氘盈余的影响显著于周边地下水。G3 点所在的西庙为一个完整独立的水文地质单元,其表现出的水化学与氢氧同位素特征均异于其他采样点。

参考文献(References)

[1]　叶宏萌,袁旭音,葛敏霞,等. 太湖北部流域水化学特征及其控制因素[J]. 生态环境学报,2010,19(1):23 − 27. [YE Hongmeng, YUAN Xuyin, GE Minxia, et al. Water chemistry characteristics and

controlling factors in the northern rivers in the Taihu Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(1):23－27.]

[2] MEREDITH K T,HOLLINS S E,HUGHES C E,et al. Temporal variation in stable isotopes (^{18}O and ^{2}H) and major ion concentrations within the Darling River between Bourke and Wilcannia due to variable flows,saline groundwater influx and evaporation[J]. Journal of Hydrology,2009,378(3):313－324.

[3] PENG Tsungren ,HUANG Chichao,WANG Chungho,et al. Using oxygen,hydrogen,and tritium isotopes to assess pond water's contribution to groundwater and local precipitation in the pediment tableland areas of northwestern Taiwan[J]. Journal of Hydrology, 2012,(450－451):105－116.

[4] 王仕琴,宋献方,肖国强,等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展,2009,20(4):495－501.[WANG Shiqin,SONG Xianfang,XIAO Guoqiang,et al. Appliance of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Advance in Water Sciences,2009,20(4):495－501.]

[5] 徐学选,张北赢,田均良. 黄土丘陵区降水—土壤水—地下水转化实验研究[J]. 水科学进展,2010,21(1):16－22.[XU Xuexuan,ZHANG Beiying,TIAN Junliang. Experimental study on the precipitation-soil water-groundwater transformation in loese hilly region[J]. Advance in Water Sciences,2010,21(1):16－22.]

[6] 蒲焘,何元庆,朱国锋,等. 丽江盆地地表——地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学,2012,33(1):48－54.[PU Tao,HE Yuanqing,ZHU Guofeng,et al. Hydrochemical characteristics of surface ground water in Lijiang Basin and its controlling factors[J]. Environmental Science,2012,33(1):48－54.]

[7] 巴图. 中蒙克鲁伦河流域草地植被退化及土壤特性比较研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.[BATU. A comparative study on degradation and soil characteristics of grassland vegetation in Mongolia Kherlen Basin[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2013.]

[8] 杨培峰,李卫平,于玲红,等. 克鲁伦河滨岸带土壤重金属污染风险评估[J]. 农业环境科学学报,2015,34(11):2126－2132.[YANG Peifeng,LI Weiping,YU Linghong,et al. Ecological risk assessment of soil heavy metals in riparian zone of Kerulen River[J]. Journal of Agro-Environment Science,2015,34(11):2126－2132.]

[9] 上官存民,文潮. 地方性氟中毒概述[J]. 陕西新医药,1980(12).[SHANGGUAN Cunmin,WEN chao. An overview of endemic fluorosis[J]. Shaanxi New Medicine,1980(12).]

[10] 刘学慧,胡日查,郑长顺,等. 2000—2009 年内蒙古呼伦贝尔市新巴尔虎右旗地方性氟中毒监测结果分析[J]. 中华地方病学杂志,2011,30(5):546－548.[LIU Xuehui,HU Richa,ZHENG Changshun,et al. Analysis of endemic flourosis of Xinbaerhuyouqi in Hulunbeier City of Inner Mongolia in 2000－2009[J]. Chinese Journal of Endemiology,2011,30(5):546－548.]

[11] 刘学慧, 李树海. 呼伦贝尔市新巴尔虎右旗改水降氟 5 年监测结果分析[C]//中华医学会地方病学分会全国氟砷中毒学术会议,2005.[LIU Xuehui,LI Shuhai. Analysis of the monitoring results of 5 years of defluoridation in Hulunbeier city in Xinbaerhuyouqi[C]//National Conference on endemic fluorosis,Chinese Medical Association,2005.]

[12] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,1987:45－66.[CHEN Jingsheng. Water environmental chemistry[M]. Beijing:Higher Education Press,1987:45－66]

[13] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社,1998.[WANG Sumin,DOU Hongshen. Lake of China[M]. Beijing: Science Press,1998.]

[14] 张艳,吴勇,杨军,等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学,2015,(9):3230－3237.[ZHANG Yan,WU Yong,YANG Jun,et al. Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town,Langzhong City[J]. Environmental Science,2015,(9):3230－3237.]

[15] 郭巧玲,熊新芝,姜景瑞. 窟野河流域不同水体同位素及水化学特征分析[J]. 水土保持学报,2016,30(2):237－242.[GUO Qiaoling,XIONG Xinzhi,JIANG Jingrui. Analysis of isotopic and hydrochemical characteristics of different waters in Kuye River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(2):237－242.]

[16] 李培月,钱会. 彭阳县饮用地下水氟离子含量空间变异性及其与地质环境的关系[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(2):33－38.[LI Peiyue,QIAN Hui. Spatial variability of flourion in drinking groundwater and its relationship with geologic environment in Pengyang Country[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2010,21(2):33－38.]

[17] 韩向红,杨持. 呼伦湖自净功能及其在区域环境保护中的作用分析[J]. 自然资源学报,2002,17(6):684－690.[HAN Xianghong,YANG Chi. An analysis of the self-purification function of Hulun Lake and its effect on regional environmental conservation[J]. Journal of Natural Resources,2002,17(6):684－690.]

[18] 牛磊. 基于亚洲地下水资源与环境地质图的跨界含水层研究[D]. 北京:中国地质大学,2011.[NIU Lei. Research on transboundary aquifers bases on map of groundwater resources and environment in Asia[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.]

[19] 胡春华,周文斌. 鄱阳湖流域水化学环境参数的变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(3): 427－433.[HU Chunhua, ZHOU Wenbin. Spatiotemporal variations of hydrochemistry parameters in the Poyang Lake catchment[J]. Yangtze River Basin Resources and Environment,2014,23(3):427－433.]

[20] TSUJIMURA M,ABE Y,TANAKA T,et al. Stable isotopic and geochemical characteristics of groundwater in Kherlen River Basin,a semi-arid region in eastern Mongolia[J]. Journal of Hydrology, 2007,333(1):47－57.

[21] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961,133(3465):1702－1703.

[22] CLARK I D, FRITZ P. Environmental isotopes in hydrogeology

[J]. Florida:CRC Press,2006,59.

[23] 顾慰祖,刘涌,贺祥,等.阿拉善高原地下水的稳定同位素异常[J].水科学进展,1998,9(4):333 – 337.[GU Weizu, LIU Yong, HE Xiang, et al. Isotopically anomalous groundwater of Alxa Plateau, Inner Mongolia[J]. Advance in Water Sciences, 1998, 9(4):333 – 337.]

[24] 张华安,王乃昂,李卓仑,等.巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下水的氢氧同位素特征[J].中国沙漠,2011,31(6):1623 – 1629.[ZHANG Hua'an, WANG Nai'ang, LI Zhuolun, et al. Features of hydrogen and oxygen isotopes in lakes and groundwater in southeast Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011,31(6):1623 – 1629.]

Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotopic characteristics of water in the low reach of Kherlen River

HAN Zhi-ming, JIA Ke-li, SHI Xiao-hong, SUN Biao, YANG Fang, WU Qi-hui

(*College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: The Kherlen River is the main river flowing into Hulun Lake, the largest lake in the north of China, and it is located in Hulun Buir Grassland as a typical grassland river. The Kherlen River originates from the south of Kent Mountain in Mongolia and flows from west to east. The Kherlen River has a total length of 1 264 km, with 206.44 km in China, and it has a total drainage area of 7 153 km^2. Combining with the regional hydrogeological data, the characteristics of the hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes of the main ions in the river water and underground water in the low reach of Kherlen River were analyzed with the Durov diagram, spatial interpolation and statistical analysis method. The results show that the hydrochemical types of the river water are mainly Na – Ca – HCO_3 type, and the hydrochemical types of underground water are Na – Cl and Ca – Na – HCO_3. The spatial distribution characteristics of the main ion concentration and hydrogen and oxygen isotope in the Kherlen River water are more stable than the groundwater, and the spatial difference is small. Hydrogen and oxygen isotope relationship indicates the groundwater and surface water were mainly supplied by the precipitation, while the groundwater is the main supply source of Kherlen River. The variation of deuterium surplus reveals that the evaporation and fractionation degree of the Kherlen River is stronger than that of the groundwater. Besides the water evaporation of the basin is mainly influenced by the geology and geomorphology of the region, the influence of the human activities on the river water is much stronger than that on the groundwater. The West Temple at the G3 point is a complete and independent hydrogeological unit, where the characteristics of hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes are different from other groundwater. The Fl-content of some groundwater in the basin exceeds certain limits, which is caused partially by the human activities to a certain degree but is mainly a naturel result of the comprehensive hydrogeological conditions. This becomes a serious threat to human survival, and the local authorities should pay more attention to this issue and take action to avoid the recurrence of fluorosis.

Key words: Kherlen River; groundwater; hydrochemistry; hydrogen and oxygen isotopes; deuterium excess